

УДК 671.327.1

Г. Л. ЛЫСЕНКО, С.Е. ТУЖАНСКИЙ, М. АЛЬБАВАНДХ

## ФОТОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ФАЗОВО-СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАССИВОВ СС-VCSEL

*Винницкий национальный технический университет,  
21021, г. Винница, ул. Хмельницкое шоссе 95, Украина  
E-mail: [lgl@vntu.edu.ua](mailto:lgl@vntu.edu.ua)*

**Аннотация.** Исследована возможность создания фотонных логических элементов на основе пространственной интерференции мод в фазово-синхронизированных массивах лазеров с двумя вертикальными связанными оптическими резонаторами. Реализация предложенного подхода позволит создать фотонные логические элементы, не нуждающиеся в фотоэлектрических и электронно-оптических преобразованиях, которые смогут функционально заменить существующие аналоги электронных и оптоэлектронных логических схем.

**Abstract.** The article is an inquiry into a possibility of creating photonic logic elements on the basis of spatial mode interference in phase-synchronized laser arrays with two vertically coupled optical resonators. Implementation of the suggested approach will allow for creation of photonic logic elements that do not require photovoltaic and electron-optical transformations, which can completely replace the currently existing functional analogs of electronic and optoelectronic logical schemes.

**Анотація.** Досліджено можливість створення фотонних логічних елементів на основі просторової інтерференції мод у фазово-синхронізованих масивах лазерів із двома вертикальними зв'язаними оптичними резонаторами. Реалізація запропонованого підходу дозволить створити фотонні логічні елементи, які не потребують фотоелектричних і електронно-оптичних перетворень, що зможуть функціонально замінити існуючі аналоги електронних і оптоелектронних логічних схем.

**Ключевые слова:** лазер с вертикально связанными резонаторами, фотонный логический элемент, интерференция.

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционные электронные технологии, на основе которых создаются современные кремниевые процессорные элементы, ввиду ряда принципиально неустранимых фундаментальных ограничений приблизились к теоретическому пределу своих возможностей. Сама физическая природа световых электромагнитных волн обуславливает очевидные преимущества оптической технологии для задач записи, передачи, обработки и хранения информации. Одной из актуальных задач в области построения оптических компьютеров и процессорных элементов является разработка фотонных логических элементов. Для создания трансфазоров, на основе которых формируются логические элементы, используются волноводные модуляторы и приборы со свойством оптической бистабильности (интерферометры на нелинейных материалах, SEED-устройства). Вместе с тем существующие в настоящее время оптоэлектронные логические элементы, как правило, используют фотоэлектронное и электронно-оптическое преобразования, полностью же фотонные логические элементы являются преимущественно пассивными и не способны генерировать оптическое излучение [1-5].

Одним из важных факторов стремительного развития информационных и сетевых технологий явилось создание компактных и легко управляемых полупроводниковых лазеров. В 1977 году японским ученым Кеничи Ига впервые была предложена конструкция лазера с вертикальным резонатором (*VCSEL* – vertical-cavity surface-emitting laser), на основе которой разработаны излучающие устройства с симметричной диаграммой направленности и низкими пороговыми токами, обеспечивающие одномодовый режим генерации продольных мод [1-2, 6-7]. Выпускаемые в настоящее время одночастотные *VCSEL* зачастую имеют небольшую для систем передачи мощность (до 2 мВт), а также трудности в управлении поляризацией излучения лазера [4-5]. Одним из перспективных решений

является усовершенствованная конструкция *VCSEL* с двумя вертикально связанными резонаторами (*CC-VCSEL* – coupled-cavity vertical surface-emitting laser), на основе которой реализованы режим одночастотной генерации с приемлемой для оптических систем передачи мощностью (до 6 мВт), режим двухчастотной генерации, а также получена возможность управления поляризацией и длиной волны излучения в процессе работы за счет малозначительного изменения соотношения токов накачки резонаторов [6-7]. На основе *CC-VCSEL* могут быть построены интегрированные фазово-синхронизированные массивы излучателей нового типа, ячейки которого способны выполнять функции фотонных логических элементов при пространственной интерференции *L*- и *S*- мод излучения без описанных выше недостатков.

### ФОТОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ *CC-VCSEL*

Предложенный подход основывается на результатах, полученных при исследованиях лазеров с двумя синхронизированными вертикальными оптическими резонаторами в режиме одновременной генерации двух близких по частоте мод излучения. Характерными технологическими особенностями структур на основе *CC-VCSEL* являются возможность выращивания соединенных резонаторов с регулировкой величины связи между ними, а также возможность интегрального изготовления 2D массивов излучателей [5-8]. Такой массив способен генерировать фазово-согласованное когерентное излучение с управляемой поляризацией, что позволяет при соответствующей модуляции сформировать параллельный массив данных для последующих логических операций, например в составе оптического процессора.

Рассмотрим модель вертикально излучающего полупроводникового лазера на основе двойной гетероструктуры с двумя связанными вертикальными резонаторами, предложенную в работах [7-8]. Модифицируем структуру *CC-VCSEL*, добавив в нее внешний управляющий оптический канал для формирования режима передачи данных (рис.1). Структура состоит из двух полостей – верхней *n-p* и нижней *p-n*, к которым приложены соответствующие напряжения  $U_1$  и  $U_2$  от источников. Пунктиром в каждой из полостей на рис. 1 схематически показан *p-n* переход со встроенными квантовыми точками. Полости резонаторов ограничены распределенными брегговскими зеркалами (РБЗ) и разделены общим диэлектрическим зеркалом, коэффициент отражения которого контролируется в процессе выращивания структуры. Изменением свойств резонаторов формируют требуемые режимы и характеристики излучения *CC-VCSEL*. Характер влияния друг на друга создаваемых в каждом из резонаторов *CC-VCSEL* оптических полей зависит от коэффициентов усиления полостей, коэффициентов оптического ограничения мод и других факторов.

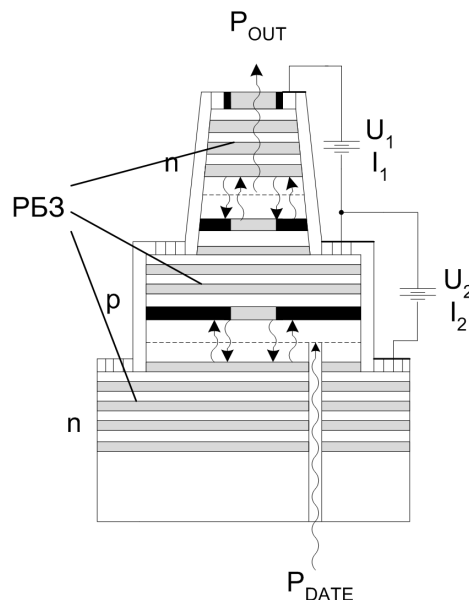


Рис. 1. Схема модифицированного *CC-VCSEL*

На основе предложенной структуры может быть сформирована элементарная фотонная логическая ячейка, принцип работы которой заключается в выделении части картины пространственной интерференции, вызываемой наложением двух мод излучения *CC-VCSEL* друг на друга (фрагмент

идеализированной интерференционной картины показан на рис. 2).

Рассмотрим интерференционное взаимодействие двух бихроматических источников (схема Юнга), для которых интенсивности каждого из вторичных источников одинаковы и поровну делятся по длинам волн  $I_i(\Delta s) = I_0(1 + \cos(k_i \cdot \Delta s))$ , где  $\Delta s$  – оптическая разница хода,  $i = 1, 2$ . При этом выполняется условие  $\Delta\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2) \ll \lambda_1, \lambda_2$ .

В таком случае результирующая интенсивность интерференции волн выражается следующим образом [4]:

$$I_{\Sigma} = I_0 + I_0 \cdot \cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot \Delta s\right) \cos(k \cdot \Delta s), \quad (1)$$

где  $k = \frac{k_1 + k_2}{2}$ ,  $\Delta k = \frac{k_1 - k_2}{2}$ .

Формула (1) отличается от формулы для монохроматического источника наличием перед вторым слагаемым  $\cos(k \cdot \Delta s)$  медленно изменяющегося множителя  $\cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot \Delta s\right)$ , модуль значения которого определяет видность интерференционной картины  $V(x) = \left| \cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot \Delta s\right) \right|$ .

Второе слагаемое в выражении (1) определяется характером интерференции и может быть как положительным, так и отрицательным. Наличие положительного интерференционного члена говорит о конструктивной интерференции (*CI* – constructive interference), отрицательного – о деструктивной интерференции (*DI* – destructive interference) [5].

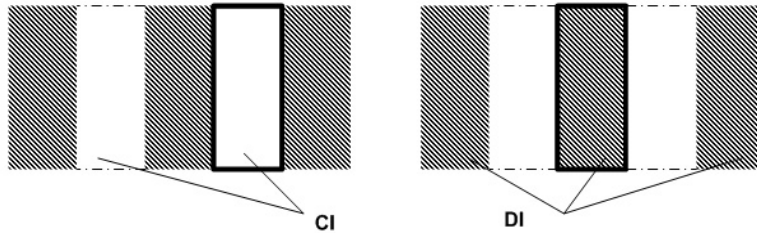


Рис. 2. Фрагмент интерференционной картины (светлые участки – *CI*, темные участки – *DI*)

Представим далее идеализированную систему с двумя монохроматическими источниками одинаковой интенсивности (тогда множитель  $\cos\left(\frac{\Delta k}{2} \cdot \Delta s\right)$  в формуле 1 можно считать единицей).

Рассмотрим сначала интерференционную зону *CI*. В ее центре имеем разницу фаз мод  $\phi_2 - \phi_1 = 0$  и соответственно, нулевую оптическую разность хода, поэтому  $\cos(k\Delta s) = +1$ . Обе моды лазера находятся в фазе, а результирующий луч имеет ту же фазу и интенсивность. Для этого случая

$$I_{CI} = 2I_0. \quad (2)$$

В центре интерференционной зоны *DI* имеем  $\phi_2 - \phi_1 = 180^\circ$ , и  $\cos(\Delta s) = -1$ . Поэтому обе моды *CC-VCSEL* находятся в противофазе, а результирующий луч принимает фазу наибольшей из них. Результирующая интенсивность в этом случае

$$I_{DI} = 0. \quad (3)$$

Таким образом, для формирования необходимого логического выходного сигнала в результате интерференции в зоне *CI* или *DI* используется дифракционная маска с отверстием требуемой формы (линия, круг) в месте максимальной видности интерференционной картины [5].

Следует отметить, что генерируемые в режиме одновременной генерации *CC-VCSEL* продольные *L* и *S* моды (*L* – мода с большей длиной волны, *S* – мода с меньшей длиной волны) можно считать квазимонохроматичными, так как расстояние  $\Delta\lambda$  между ними малы, в частности для типовой структуры *GaAs/AlGaAs* расчетное значение разности длин волн мод составляет от 0,8 нм (при брегговской длине волны  $\lambda_{br}=940$  нм однако это требует наличия порядка 50 пар слоев среднего зеркала гетероструктуры) до 50 нм [10]. Но даже и в последнем случае видность интерференционной картины в центре СИ интерференционной картины является максимальной, хоть и не равной единице, размывание же максимумов и минимумов происходит постепенно по мере удаления от центра картины.

Так, для разницы длин волн  $\Delta\lambda=50$  нм полное размывание произойдет при порядке интерференции  $n = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} \approx 9$ , а первый ноль видности обеспечивается при оптической разности хода

$$\Delta S = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} \approx 8,8 \text{ мкм} [9].$$

Таким образом, предложенная на рис. 1 структура может быть вполне применима для построения фотонных логических элементов, если обеспечить режим двухчастотной генерации с оптимальной разницей длин волн и управлением фазовым сдвигом между *L*- и *S*- модами *CC-VCSEL* с помощью внешнего управляющего оптического канала, что возможно осуществить при минимальных соотношениях пороговых значений токов накачки.

Для построения элементарных фотонных логических ячеек И и НЕ на основе модифицированного *CC-VCSEL* в режиме двухчастотной генерации предлагаются схемы, представленные на рис. 3 и рис. 4.

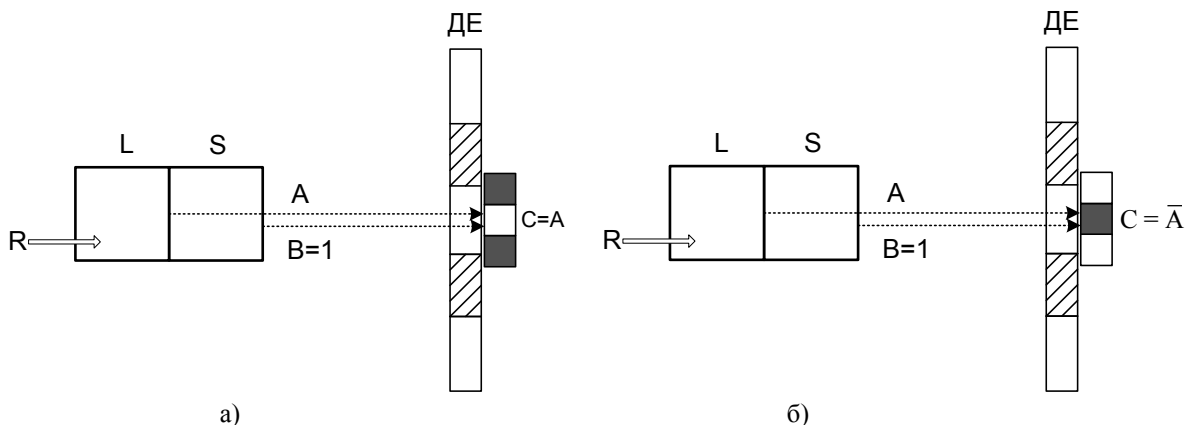


Рис. 3. Схема фотонных логических элементов И (а) и НЕ (б)

В случае конъюнктора (рис. 3, а) управляющий оптический вход схемы R может не использоваться, при этом результатом является СИ в центральной области видности (первого интерференционного максимума). Если считать излучение обеих мод считать монохроматичным и одинаковым по интенсивности (для логического нуля, например максимальное значение интенсивности мод  $I_{LO}=I_{SO}=I_{пор}$ , а для логической единицы  $I_{L1}=I_{S1}=2I_{пор}$ ), то результирующим значением интенсивности выходного сигнала C будет  $I_{CO} \leq 3I_{пор}$ , а  $3I_{пор} < I_{C1} \leq 4I_{пор}$ .

Для инвертора (рис. 3, б) управляющий вход R обеспечивает фазовый сдвиг и оптическую разницу хода между *S* и *L* – модами, соответствующие нулевой (минимальной видности) результирующей интерференционной картины DI. При значении интенсивности *S*- моды меньше порога логической 1 ( $A=0$ ).

Для получения дизъюнктора (рис. 4) можно использовать схему, которая похожа на И (рис. 3, а), однако результирующим значением интенсивности в области СИ выходного сигнала C для получения логического нуля или единицы необходимо считать другие значения интенсивностей:  $I_{CO} \leq 2I_{пор}$  (лог. 0), а  $2I_{пор} < I_{C1} \leq 4I_{пор}$  (лог. 1).

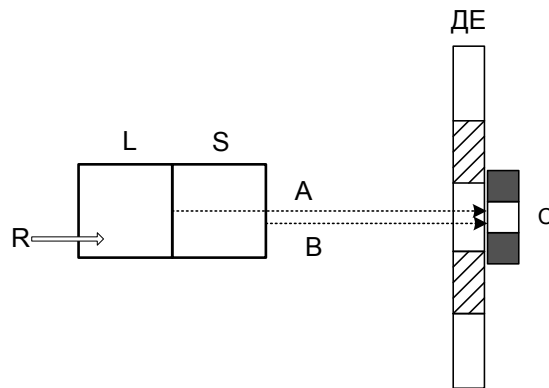


Рис. 4. Схема фотонного логического элемента ИЛИ

На базе таких элементарных логических элементов на модифицированных CC-VCSEL могут быть построены и другие элементы (И-НЕ, ИЛИ-НЕ и др.), которые необходимы для создания полноценного функционального базиса фотонных логических элементов.

Кроме того, интеграция соединенных резонаторов в пределах вертикальной структуры такого лазера открывает новые возможности из-за способности влиять на взаимодействие полей между резонаторами и возможности управления состоянием поляризации лазерного излучения [10]. Это позволит строить на их основе перспективные фотонные вычислительные модули, для переключения логических состояний элементов которых необходимы минимальные пороговые энергии.

На рис. 5 изображена обобщенная структура блока матрицы фотонного вычислительного элемента, одним из основных компонентов для формирования когерентного оптического излучения, реализующих в дальнейшем логические операции, является слой на основе массива предложенных выше модифицированных ячеек CC-VCSEL с оптическими управляющими каналами. Данный принцип может быть использован для построения интегральных фотонных логических элементов, которые позволят в перспективе создать матричные оптические процессоры и специализированные вычислительные устройства для параллельных оптических вычислений.

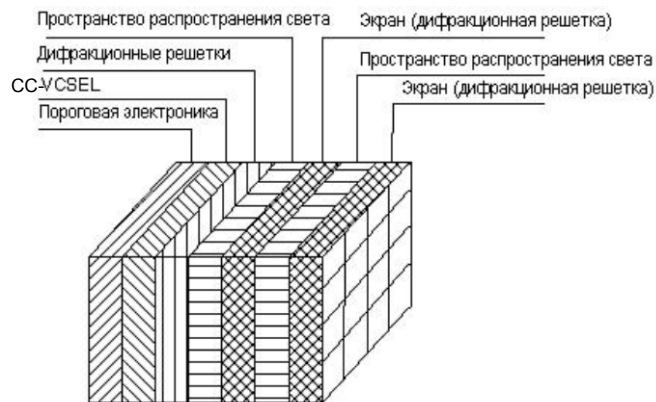


Рис. 5. Структура блока матрицы фотонного вычислительного элемента

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены физические принципы и обоснована техническая возможность построения структур оптических логических элементов для выполнения основных логических операций, которые функционируют на основе пространственной интерференции  $L$ - и  $S$ - мод излучения фазово-синхронизированных полупроводниковых лазеров с вертикально связанными оптическими резонаторами (в режиме двухчастотной генерации). Такие логические фотонные структуры и могут стать основой полнофункционального базиса фотонных логических элементов, хорошо интегрируются в 2D массивы, а также имеют хорошие перспективы для создания на их основе принципиально новых матричных вычислительных структур.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исихара С. Оптические компьютеры: Новая эра науки. – М.: Наука, 1992. – 96 с.
2. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. – М.: Высшая школа, 1988. – 237 с.
3. Кожемяко В.П. Основы теории и схемотехники оптоэлектронных элементов и устройств логико-временного типа: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.05. – К., 1988. – 519 с.
4. Лысенко Г.Л., Аль Равашдех Медин, Кобзаренко Р.Л. Оптический вычислительный модуль оптического компьютера / Г.Л. Лысенко, М. Аль Равашдех, Р.Л. Кобзаренко // Вісник ВПІ – 2003. – №6. – С. 360-364.
5. Евтихий Н.Н., Каринский С.С., Мировицкий Д.И. Когерентно - оптические устройства передачи и обработки информации. – М., 1987. – 158 с.
6. Caulfield H.J. The logic of optics and the optics of logic / Caulfield H.J, Westphal J. // Information Sciences – 2004, Vol. 162, No. 1, pp. 21–33.
7. Koyama Fumio. Recent Advances of VCSEL Photonics // Journal of Lightwave Technology. – 2006, Vol. 24, No. 12, pp. 4502-4515.
8. Brunner M. Continuous-Wave Dual-Wavelength Lasing in a Two-Section Vertical-Cavity Laser / M. Brunner, K. Gulden, R. Hovel [и др.] / IEEE Phot. Techn. Lett. – 2000, No. 12, pp. 1316-1325.
9. Логгинов А.С. Двухчастотные лазеры со связанными вертикальными резонаторами / А.С. Логгинов, А.Г. Ржанов, Д.В. Скоров // Квантовая электроника. – 2006, Т. 36, № 6, с. 520–526.
10. Badilita V. Control of Polarization Switching in Vertical Coupled-Cavities Surface Emitting Lasers / V. Badilita, J.-F. Carlin, M. Hegems [и др.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2004, No. 16, pp. 365-367.

Надійшла до редакції 11.12.2013р.

**ЛЫСЕНКО ГЕННАДИЙ ЛЕОНИДОВИЧ** – к.т.н., доцент, профессор кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина.

**ТУЖАНСКИЙ СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ** – к.т.н., доцент, доцент кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина.

**АЛЬРАВАШДЕХ МЕДИН** – соискатель кафедры лазерной и оптоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина.